



①⑨ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 197 50 198 A 1**

⑤① Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**B 64 D 15/12**  
H 05 B 6/80

②① Aktenzeichen: 197 50 198.2  
②② Anmeldetag: 13. 11. 97  
④③ Offenlegungstag: 27. 5. 99

DE 197 50 198 A 1

⑦① Anmelder:  
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 76133  
Karlsruhe, DE; DaimlerChrysler Aerospace Airbus  
GmbH, 21129 Hamburg, DE

⑦② Erfinder:  
Feher, Lambert, Dr., 76351  
Linkenheim-Hochstetten, DE; Schnack, Manfred,  
Dipl.-Ing., 27721 Ritterhude, DE

⑤⑥ Entgegenhaltungen:  
DE 33 20 588 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ Enteisung von Flugzeugen mit Mikrowellen

DE 197 50 198 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein avionisches Enteisungssystem zur präventiven Verhinderung von Vereisung oder zur Enteisung an vereisungsgefährdeten Zonen eines Flugzeugs mittels Mikrowellen.

Während eines Fluges kann aufgrund meteorologischer Bedingungen eine Vereisungssituation für das Flugzeug auftreten. Der Ansatz von Eis am Flugzeug beeinträchtigt insbesondere bei den aerodynamisch tragenden, d. h. auftriebswesentlichen Strukturen das Flugverhalten durch eine Verringerung des laminaren Strömungsflusses bis zum Abreißen des Luftstromes bei niedrigen Geschwindigkeiten.

Besonders kritische Stellen des Eisansatzes sind die Vorflügel - das sind ausfahrbare, profilverlängernde Kanten an den Tragflügelvorderkanten, die eine Profilverlängerung bewirken und den Auftrieb bei niedrigen Geschwindigkeiten unterstützen - Flügel- und Leitwerksnasen, Außenflügel, Triebwerkseinläufe, Vorderkanten der Höhen- und Seitenruder, Cockpitfenster PAX-Türen und Frachttore.

Wegen dieser für die Flugsicherheit hochbedeutsamen Bereiche existieren verschiedene Standardverfahren für die Enteisung:

- Warmluftenteisung - dabei wird den Triebwerken Warmluft entnommen, die über ein Rohrsystem und Ventilen an die gefährdeten Stellen geleitet wird.
- Flüssigkeitsenteisung - aus einem Reservoir wird Enteisungsflüssigkeit über ein Rohrsystem mit Pumpen und Ventilen aus einem porösen Stahlblech ausgeströmt.
- Elektrische Enteisung - an den gefährdeten Stellen sind in der Oberfläche Enteisungsmatten (eine Art Heizmatten) aufgebracht, die ohmsche Wärme erzeugen.

Die erste und zweite Enteisungstechnik zeichnen sich durch eine hohe Leistungsentnahme während des Fluges sowie durch die verlorene Wärmeenergie durch thermische Diffusion in das umgebende metallische Tragflächenmaterial aus. Im zweiten Fall besteht ein System, das nicht beliebig lange zur Verfügung steht weil die Enteisungsflüssigkeit in der Menge begrenzt ist.

Anforderungen an die Flugzeugweiterentwicklung entstehen aus der Bewältigung steigender Passagierzahlen, der Überbrückung größerer Reichweiten, der Senkung des Treibstoffverbrauchs und der Einschränkung der Emission. Stets von höchster Bedeutung ist die Flugsicherheit, woraus sich u. a. die Forderung an eine leistungsfähige Enteisung ergibt.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Enteisungssystem für vereisungsgefährdete Zonen an Flugzeugen bereit zu stellen, das zuverlässig mit minimalem Energieaufwand solche Zonen während des Fluges durch problematische Wettergebiete eisfrei hält bzw. in kurzer Zeit eisfrei macht. Dabei müssen neue, für die Avionik voll taugliche Verbundmaterialien in die Konstruktion mit aufgenommen werden.

Die Aufgabe wird durch ein Enteisungssystem gemäß dem Anspruch 1 gelöst. Dielektrische Verbundwerkstoffe, die im genutzten Frequenzbereich hochpermeabel sind, werden zur Gestaltung der vereisungsgefährdeten aerodynamischen Bereiche verwendet. Diese Zonen werden entsprechend ihres Auftriebsbeitrags von einem Mikrowellenleitungssystem angefahren, in dem die von einer Mikrowellenquelle ausgehende Mikrowelle geführt wird. Der Innen- und Mittelflügel trägt z. B. maßgebend zum Auftrieb bei. Die Auskoppelvorrichtung oder die Antenne an jedem Ende eines

Wellenleitersystems ist optimal seiner Enteisungszone angepaßt. Im Falle mehrerer Mikrowellenquellen besteht noch ein System an redundanten Wellenleiterverbindungen, die durch Zu- und Wegschalten eine oder gar mehrere ausgefallene Mikrowellenquelle/n überbrücken.

Der Unteranspruch 2 kennzeichnet geeignete, spezielle Verbundmaterialien wie CFK-/GFK-Strukturmaterialien, die avionisch als auch mikrowellentechnisch geeignet sind.

Weiter wird ein Gyrotron als Mikrowellenquelle gekennzeichnet, weil es für Dauerbetrieb unter Abgabe hoher Leistung besonders geeignet und zuverlässig ist, aber auch für den Pulsbetrieb ohne Abstriche tauglich ist (Anspruch 3). Das Magnetron kann bei nicht großer Leistungsanforderung für den Dauerstrichbetrieb in Betracht gezogen werden. Für den Pulsbetrieb ist es unter Berücksichtigung der geringeren Leistungsabgabe ebenfalls geeignet (Anspruch 4).

Monochromatischer Betrieb der eingesetzten Mikrowellenquelle ist die einfachste technische Betriebsweise und daher auf jeden Fall für die Enteisung ausreichend (Anspruch 5), da sie dafür ohnehin in der optimalen Frequenz betrieben wird.

Anspruch 6 kennzeichnet eine Art Antennenstruktur (Leckwellenantenne) an wirklich großen Tragflügeln zur Enteisung großflächiger, nicht direkt frontal angeströmter, gewissermaßen nur überströmter Bereiche wie den Außenflügel.

Einerseits sind CFK/GFK-Materialien dielektrische Kunststoffe und haben eine erheblich schlechtere thermische Leitfähigkeit als Metalle. Andererseits sind solche Kunststoffe für elektromagnetische Wellen im Bereich von 20 bis 40 GHz nahezu durchsichtig, d. h. hochpermeabel aber dennoch regulierbar erwärmen. Als laminierte Strukturmaterialien sind sie extrem leicht, können aber zu mechanisch extrem steifen Formen verarbeitet werden. Sie können im Verbund mit im Flugzeugbau herkömmlichen Metallen (Aluminium/Aluminiumlegierungen) zu aerodynamisch äquivalenten Strukturen verarbeitet werden.

Da das CFK/GFK-Strukturmaterial für elektromagnetische Wellen extrem permeabel ist - Messungen zwischen 22-40 GHz zeigen das - wird ebenfalls das an den Grenzflächen dieser Materialien ansetzende Eis bei Mikrowelleneinfall instantan selbst erwärmt. Die Art der Heizung ist eine Volumenheizung, dadurch entfallen Wärmeleitungsverluste, wie sie bei der ohmschen bzw. Warmluftbeheizung zwangsläufig bestehen. Die notwendige Heizleistung ist dadurch in erster Näherung der Masse des Eises und der erforderlichen Heizrate proportional. Wirkungsgradmindernde Effekte dieses Systems können lediglich durch Verluste im Wellenleitungssystem bzw. in der Mikrowellenquelle selbst auftreten. Daher führt eine konsequente Optimierung und Auslegung der mikrowellentechnischen Komponenten zu einer bestmöglichen Ausnutzung der zur Verfügung stehenden elektrischen Leistung aus den Triebwerken.

Ein weiterer Vorteil, bedingt durch diesen hohen Frequenzbereich, liegt in den niedrigen Transmissionsverlusten bei der Übertragung durch überdimensionierte Hohlleiter und in der hohen Homogenität der elektromagnetischen Felder, die anlagentechnisch damit erreicht werden. Damit besteht keine Gefahr, daß eine Hot Spot/Cold Spot-Bildung am CFK/GFK-Strukturmaterial erfolgt, also lokale Überhitzungen und daraus folgende Materialermüdung bzw. -deformation bzw. Gebiete, die ungleichmäßig abtauen, entstehen. Vielmehr wird das Eis sofort, gleichmäßig und kontrollierbar erwärmt, in seiner Struktur zerstört und dann rasch von den problematischen Zonen weggerissen.

Die Mikrowellenquelle wird monochromatisch oberhalb 20 GHz betrieben. Bei einer solchen Frequenz ergeben sich keine Störungen mit Funk- und Navigationssystemen (ATC,

VOR, ADF, Transceiver: 100 MHz - 1 GHz-Bereich, Transponder: <8 GHz). Gefährdete Vereisungszonen am Flugzeug können durch lokales Anschalten des Enteisungssystems vorbeugend eisfrei gehalten werden, d. h. die sehr kleinen Eistropfen (ca. 15 - 40 Micron groß) werden im HF-Feld durch direkten Wärmeübergang abgehalten, auf diesen Zonen zu kondensieren. Das ist vom Leistungsbedarf her verhältnismäßig gering, da dieser für den kontinuierlichen Betrieb unterhalb der zur tatsächlichen Enteisung notwendigen Leistung liegt.

Die getrennte Speisung der verschiedenen Wellenleitersysteme erlaubt eine selektive Kontrollierbarkeit und Steuerung des Enteisungsprozesses. Die verschiedenen Zonen können einzeln mit geringer bis sehr hoher kontinuierlicher Leistung gespeist werden, womit Eisfreihaltung (präventive Enteisung) bis zur plötzlich notwendigen Enteisung wahlweise je nach Bedarf durchgeführt werden kann.

Ein überdimensionierter Redundanzwellenleiter, der den Ausgang zweier Mikrowellenquellen verbindet, minimiert die Leitungsverluste im Falle des Ausfalls einer Gyrotroneinheit. Die noch funktionstüchtige andere Gyrotroneinheit übernimmt die Speisung auch des anderen Leitersystems. Die Redundanz der Enteisungsanlage kann bei mehr als zwei Mikrowellenquellen entsprechend ausgebaut werden.

Die Gewichtsanforderungen für das Mikrowellen-Enteisungssystem sind zur Erzeugung elektromagnetischer Wellen im erwähnten Frequenzbereich im Vergleich zu herkömmlichen Systemen als gering anzusehen. Der wesentliche Gewichtsbeitrag kommt von dem Netzteil und einem Magnetpulvensystem der Mikrowellenquelle her, die übrigen Komponenten wie Wellenleiter und Auskoppelinrichtungen sind Rohrsysteme, die keinen maßgebenden Gewichtsanteil bedeuten.

Die Erfindung wird in folgendem für den Tragflügelbereich anhand der Zeichnung näher erläutert.

Es zeigen:

**Fig. 1** Tragfläche mit CFK-Einsatz,

**Fig. 2a** über ein Gyrotron mikrowellengespeistes Enteisungssystem an der Tragfläche,

**Fig. 2b** Enteisungssystem ohne Außenflügelenteisung,

**Fig. 3** Auftriebsverteilung am Tragflügel.

**Fig. 3** zeigt den Tragflügel eines Flugzeugs mit der qualitativen Auftriebsverteilung während des Starts bzw. der Landung. Bei großen Tragflächen muß zum einen für die optimale aerodynamische Form während des Fluges der äußere Mittelteil des Flügels bzw. der Außenteil strukturell der Erhöhung von Biegemomenten entgegenwirken. Zum andern muß während dieser Flugsituation insbesondere am Mittel- und Innenteil des Tragflügels einer Vereisung der Vorflügel (Slats) vorgebeugt werden, um einen maximalen Auftrieb zu gewährleisten. Diese Zonen sind in **Fig. 1** angedeutet, die CFK-substituierten drei Vorflügelbereiche an der Vorderkante des Flügels und die großflächige CFK-Beplankung im Außenflügelbereich sind schraffiert angedeutet. Im hinteren Tragflächenbereich befindet sich das kritische Flügelprofil, das über die Wölbklappen erzeugt wird.

Das Mikrowellen-Enteisungssystem ist in **Fig. 2** schematisch in den Tragflügelbereich von **Fig. 1** eingezeichnet. Die Mikrowellenquelle befindet sich im Rumpf des Flugzeugs in Ansatzbereich der Tragfläche. Es ist ein Gyrotron, das bei 24,15 GHz (entspricht einer Wellenlänge von 1,225 cm) betrieben wird. Vom Gyrotron führt das Wellenleitersystem mit den drei Wellenleitern weg, wovon einer nur den auftriebsrelevanten Innen- und Mittelbereich am Vorflügel versorgt, der zweite endet im weniger auftriebsrelevanten Vorflügel des Außenflügels und der dritte im Außenflügelbereich. Die Wellenleiter für den Vorflügel enden in Auskoppelinrichtungen, die für den Außenflügelbereich zur flächigen

Enteisung spezielle Leckwellen-Antennenstrukturen sind. Die Hohlleiterverlegung ist nicht maßstabsgerecht sondern der Übersichtlichkeit halber nur schematisch dargestellt.

Eis besitzt im Frequenzbereich von 20 - 40 GHz ein Absorptionsvermögen, das oxydischen Keramiken wie  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vergleichbar ist, nämlich  $\tan \delta = 10^{-4} - 10^{-5}$ . Somit ist ein besonders effektiver Heizmechanismus gegeben, da die elektromagnetische Welle in das Eis eindringt und im gesamten Volumen sofort eine Erwärmung hervorruft. Sämtliche thermischen Verzögerungen entfallen, wie sie durch Heizen über eine Oberfläche entstehen und primär durch das Aufheizen der Oberfläche selber, über die ein Wärmeübergang letztlich erreicht werden soll. Der Volumenheizmechanismus kompensiert zudem die extrem schlechte Wärmeleitung von Eis, die im Fall eines Abschmelzens an einer Grenzschicht das Abtauen des Materials im gesamten nur langsam vorstatten gehen läßt.

An der Grenzflächenschicht Eis/Tragfläche setzt bei der Mikrowellen-Enteisung zudem ein Abtauen ein, da das CFK/GFK-Material selber in kürzester Zeit auf eine Temperatur zwischen 60 und 90°C gebracht wird. Ein Sprung der dielektrischen Eigenschaften um über vier Größenordnungen auf  $\tan \delta = 1,6$  der abgetauten Wasserschicht an der Tragfläche hat zur Folge, daß, nachdem das Eis im gesamten Volumen erwärmt wurde, verstärkt an der Grenzschicht Eis/Wasser geheizt wird. Das führt zu einer sehr schnellen Zerstörung der anliegenden Eisstruktur und dem Abfallen der Eisfragmente von der Tragfläche.

#### Patentansprüche

1. Enteisungssystem zur Verhinderung eines Eisansatzes oder zur Enteisung an vereisungsgefährdeten Zonen eines Flugzeugs mittels Mikrowellen,

**dadurch gekennzeichnet**, daß

vereisungsgefährdete Zonen am Flugzeug aus dielektrischen, avionisch einsetzbaren Strukturen und Verbundwerkstoffen bestehen, die für elektromagnetische Wellen in einem Frequenzbereich oberhalb 20 GHz dielektrisch hochpermicabel sind,

im Flugzeug mindestens eine Mikrowellenquelle untergebracht ist, die gepulst oder kontinuierlich in einem Frequenzbereich außerhalb avionisch genutzter Frequenzen abstrahlt,

von jeder Mikrowellenquelle autark schaltbare Wellenleitersysteme ausgehen und zu unterschiedlich vereisungsgefährdeten Zonen führen, (wo über an die Struktur dieser Zonen angepaßte Mikrowellenauskoppelinrichtungen (Antennen) die entsprechend ihrer Bedeutung für den Auftrieb des Flugzeugs unter Einbeziehung der gegenwärtigen meteorologischen Situation Mikrowellenenergie bedarfs- und leistungsgerecht auskoppeln) und der besonders auftriebsrelevante Innen- und Mittelflügel durch ein eigenes autarkes Wellenleitersystem zur Verhinderung der Kondensation von Wassertröpfchen schon frühzeitig oder ständig mit niedriger Leistung (stand by modus) bestrahlt wird,

jedes Wellenleitersystem aus hochmodigen, flexiblen Wellenleitern mit abschnittsweise leistungskonstanter, flächenhomogener, regelbarer Hochfrequenz-Auskopplung (Antenne) besteht, wodurch im Strukturverbundwerkstoff und im gegebenenfalls an der Grenzfläche angesetzten Eisvolumen eine instantane und gleichmäßige Erwärmung eintritt,

die Mikrowellenquellen über Redundanzwellenleiter miteinander verbunden sind, die zu und abschaltbar sind, um den Ausfall mindestens einer Mikrowellen-

quelle durch die noch funktionierende/funktionierenden zu überbrücken.

2. Enteisungssystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Verbundwerkstoffe Kohlefaserkunststoff (CFK)/Glasfaserkunststoff (GFK)-Strukturmaterialien sind. 5

3. Enteisungssystem nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Mikrowellenquelle ein Gyrotron ist.

4. Enteisungssystem nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Mikrowellenquelle ein Magnetron ist. 10

5. Enteisungssystem nach Anspruch 3 und 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Mikrowellenquelle monochromatisch abstrahlt. 15

6. Enteisungssystem nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß zur großflächigen und gleichmäßigen III<sup>+</sup>-Beaufschlagung an den Außenflügeln und anderen flächig vereisungsgefährdeten Bereichen eine sogenannte Leckwellenantennenstruktur besteht. 20

---

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

---

25

30

35

40

45

50

55

60

65

Fig. 1

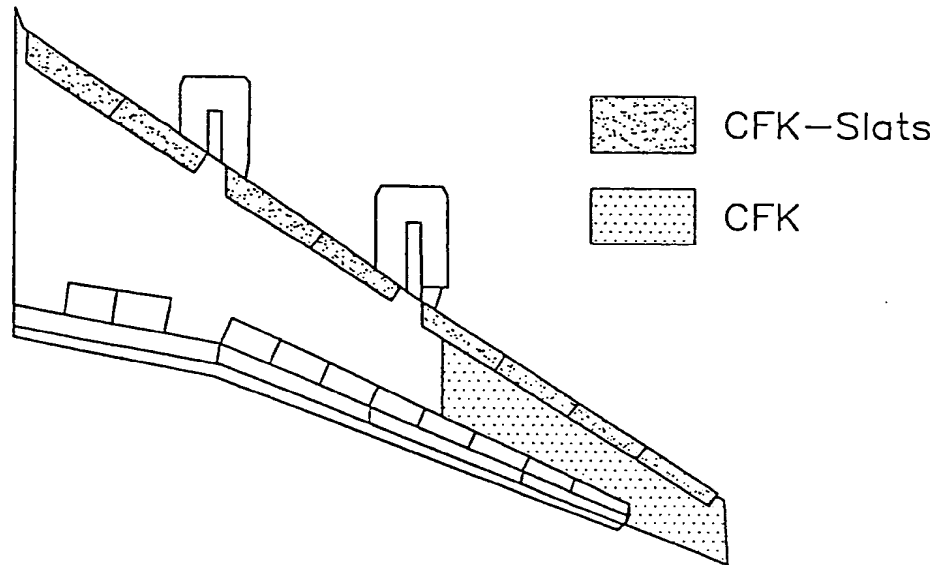


Fig. 2a

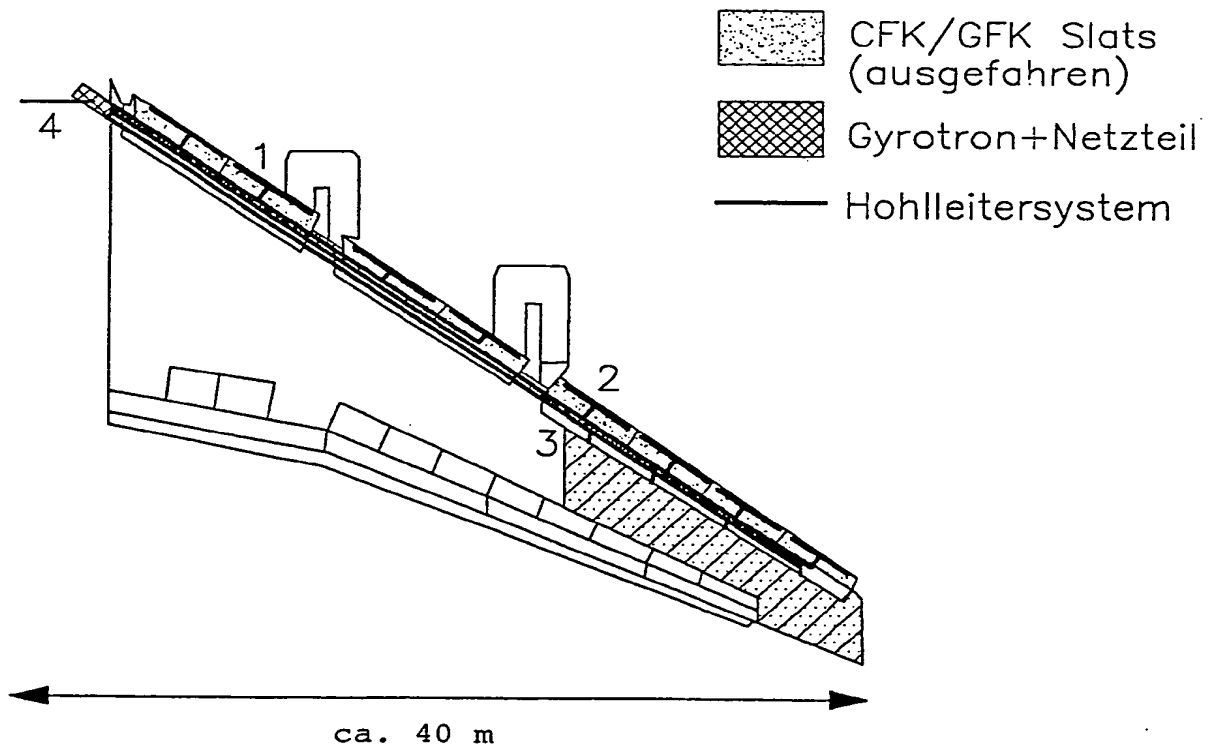


Fig. 2b

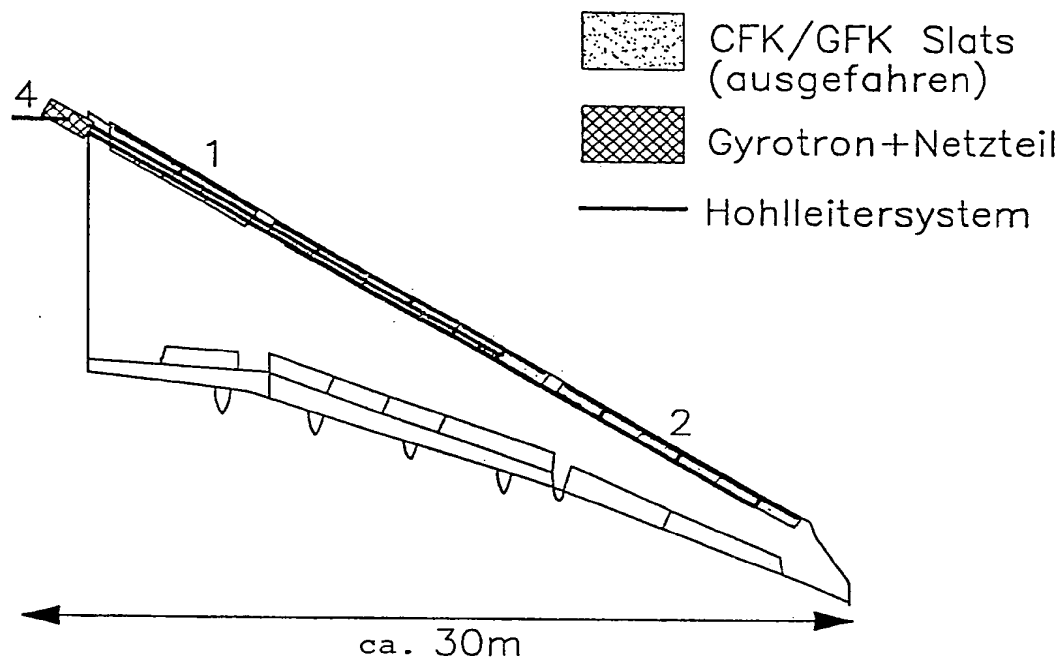


Fig. 3

